

Opisać świadomość na skali od zera do jeden. Perturbacyjny Indeks Złożoności jako naukowa próba pomiaru świadomości na poziomie indywidualnym

**Describing consciousness on scale from zero to one.
Perturbational Complexity Index as a scientific attempt
on measuring consciousness on an individual level**

Abstract: Scientific study of consciousness entered a new era with research focused on finding its neural correlates. The article depicts reasoning underlying this paradigm and controversies it arises using a novel tool designed to measure one's level of consciousness by means of analyzing EEG signal. Perturbational Complexity Index, created by team led by Giulio Tononi, is used to present theoretical debate concerning the possibility of creating an objective consciousness measure. Stemming from reflections on mechanisms of loss of consciousness, authors of the index infer the informational nature of the phenomena, which is said to be demonstrated by experiments with participants under anesthesia, in deep sleep or suffering from disorders of consciousness. The extraordinary capability of the index to measure the level of consciousness on an individual level and its practical applications are discussed in context of possibility of experimental access to subjective experience.

Key words: consciousness, disorders of consciousness, EEG, diagnosis

Zagadnienie świadomości, uznawane za jedno z najtrudniejszych problemów współczesnej nauki, weszło w nową erę dzięki paradygmatowi poszukiwania jej neuronalnych korelatów. Niniejszy artykuł przedstawia tę tematykę na przykładzie najnowszej propozycji zmierzającej do eksperymentalnego pomiaru, a następnie oszacowania poziomu świadomości przy użyciu metod analizujących dane EEG. Bazując na refleksji teoretycznej dotyczącej możliwości stworzenia narzędzia mierzącego świadomość, autorzy prezentują koncepcję Perturbacyjnego Indeksu Złożoności, stworzonego na podstawie teorii Giulio Tononiego. Twórcy wspomnianego Indeksu, wychodząc od badań nad mechanizmami utraty świadomości podczas snu, przekonują o informacyjnej naturze tego fenomenu. Swoje tezy podpierają wynikami badań z udziałem osób w głębokim śnie, poddanych działaniu środków znieczulających czy pacjentów

cierpiących na zaburzenia świadomości. Przekonują przy tym, że pierwszy raz możliwe jest diagnozowanie poziomu świadomości nie tylko w wyniku analizy danych grupowych, ale również na poziomie indywidualnym, czyniąc z indeksu narzędzie do użytku klinicznego i rehabilitacyjnego. Nowatorstwo zaproponowanego narzędzia jest dyskutowane w kontekście eksperymentalnego dostępu do subiektywnego doświadczenia, które według wielu badaczy jest nierozzerwalnie związane z fenomenem świadomości.

Trudny problem ze świadomością

Prestiżowy magazyn „Science”, obchodząc w 2005 roku swoje 125-lecie, ogłosił listę najważniejszych pytań naukowych, które zdaniem redakcji powinny zajmować badaczy przez kolejne lata. Wśród dwudziestu pięciu zagadnień drugie miejsce, po pytaniu o naturę wszechświata, zajęła kwestia poszukiwań biologicznych podstaw świadomości [Miller 2005]. To podkreślenie wagi problemu przez redakcję „Science” nie tylko wydaje się wyrazem uznania dla złożoności tego zagadnienia oraz potencjalnych korzyści postępu w pracy nad nim – pokazuje również niezwykłą trudność towarzyszącą wpisaniu badań nad świadomością w krąg dociekań ściśle naukowych (w tym wypadku z zakresu biologii).

Trudności te wynikają między innymi z tego, że przez wieki badania nad naturą świadomości były prowadzone głównie przez filozofów posługujących się odmiennymi pojęciami i sposobami wyjaśniania od tych stosowanych obecnie w naukach empirycznych. Z tego powodu współczesne naukowe próby zrozumienia tego fenomenu muszą sobie radzić z konceptualizacjami problemu świadomości, których nie da się rozstrzygnąć za pomocą metod stosowanych we współczesnej nauce. Kolejną przeszkodą jest obecna w obiegu naukowym wielość teorii świadomości, uniemożliwiająca stworzenie spójnego poglądu na temat jej istoty i funkcji, wspólnego dla wszystkich badaczy. W rezultacie nie ma możliwości jednoznacznego wskazania jej obserwowalnych przejawów, na podstawie których można byłoby budować jej naukową – empiryczną – koncepcję. Jednym ze słynniejszych sformułowań tych wątpliwości było wystąpienie podczas konferencji w Tucson w 1996 roku filozofa Davida Chalmersa [1998]. Przyniósł on wówczas z sobą na mównicę suszarkę do włosów, którą zaprezentował jako „świadomościomierz”. Chalmers zastosował ten żartobliwy wybieg, argumentując, że świadomość ze swej natury leży poza możliwością bezpośredniej obserwacji. Dlatego suszarka do włosów nie gorzej służy do badania świadomości niż na przykład metody neuroobrazowania.

Chalmers w swoim wystąpieniu skrytykował przede wszystkim bezrefleksyjne podejście części badaczy z dziedziny neuronauki do tzw. neuronalnych korelatów świadomości (*neural correlates of consciousness* – NCC). Wskazał dwa zasadnicze problemy w badaniu świadomości za pomocą poszukiwania jej korelatów. Po pierwsze, jest ona badana poprzez pomiar aktywności mózgu – tę z kolei uznaje się za korelat świadomości wyłącznie na mocy arbitralnie przyjętego konstruktu teoretycznego (np. utożsamienie jej z obecnością oscylacji neuronalnych w korze mózgowej w paśmie 40Hz zaproponowane przez Cricka i Kocha, 1990). Dlatego pomiar

świadomości jest w rzeczywistości jedynie pomiarem jej z góry założonego korelatu, a wyciągane z tego pomiaru wnioski w sposób pewny odnoszą się jedynie do samego korelatu, a nie do świadomości. Chalmers uważa to za niedostatecznie satysfakcjonujące, skoro obiektem zainteresowania jest świadomość. Problem ten nie może jego zdaniem zostać przewyższony, ponieważ wynika z ontologicznej autonomiczności świadomości, czyli jej istotnej, jakościowej odmienności od każdego istniejącego lub możliwego fizykalnego zjawiska.

Po drugie, poznawcza niedostępność, czyli brak możliwości jakiegoś rodzaju bezpośredniego poznania samej świadomości – jej obserwacji lub intelektualnego ujęcia i opisanie – uniemożliwia skonstruowanie jakiegokolwiek dodatkowego narzędzia, które mogłoby być stosowane jako miara kontrolna metod neuroobrazowania. Taka kontrolna miara miałaby pozwolić na obserwację zależności między aktywnością mózgową (czyli neurokorelatem) a samą świadomością. Chalmers uważa, że NCC mogą być przydatne w poszukiwaniach natury świadomego doświadczenia, wątpi jednak, by można było zrealizować ten cel jedynie przy ich użyciu.

Wskazywane przez filozofa trudności są szczególnie widoczne w badaniach naukowych prowadzonych w nurcie pozytywistycznym, w których nie można korzystać z niektórych narzędzi, np. raczej nie opiera się rozważań i wniosków na introspekcji. Poznanie z perspektywy pierwszoosobowej, uznawane czasem za jedyne udzielające bezpośredniego dostępu do świadomości, nie jest uważane za odpowiednio rygorystyczne postępowanie eksperymentalne. By badać świadomość, konieczne zatem jest ustalenie obserwowalnych przejawów bycia świadomym, na podstawie analizy których dałoby się skonstruować narzędzia do pomiaru świadomości. Dlatego właśnie współczesna nauka o świadomości jest oparta właściwie w całości na badaniu jej korelatów: reakcji motorycznych, zachowań językowych, a także aktywności mózgu. Wydaje się więc, że to, co Chalmers zarzuca nauce o świadomości, jest w nią wpisane na trwałe i tak długo będzie uważane za problem, jak długo subiektywny aspekt świadomości będzie uznawany za istotny.

Zmusza to badaczy do zejścia ze stanowiska skrajnie fizykalistycznego redukcjonizmu właściwego naukom ścisłym na rzecz poszukiwania rozwiązań uwzględniających subiektywne doświadczenie osób badanych. Przekłada się to na nowe rozwiązania metodologiczne, wprowadzające np. elementy introspekcji do procedur eksperymentalnych. Najprostszym sposobem jest oczywiście pomiar tego, czy dana treść została uświadomiona, czy nie – bazuje on na dychotomicznym rozróżnianiu bodźców uświadamianych i nieuświadamianych [np. Holender 1986]. Tak konstruowane obiektywne miary odwołują się do zdolności osób badanych do rozpoznania, co było treścią ich świadomego doświadczenia [Wierzchoń 2013]. Wyniki uzyskuje się za pomocą statystycznej analizy poprawności (wykorzystując głównie teorię detekcji sygnału) lub czasów reakcji, interpretując zmiany w zakresie tych parametrów jako pośrednie miary uświadomienia.

Takie miary całkowicie ignorują subiektywne doświadczenie osób badanych, redukując rozumienie świadomości do warunku koniecznego, by człowiek mógł funkcjonować w środowisku. Współczesne badania pokazują jednak, że możliwe są poprawne zachowania oparte na oddziaływaniach bodźców nieuświadomionych [Dehaene 2008]. Sama reakcja może natomiast zależeć od wielu czynników niezwiązanych bez-

pośrednio z poziomem świadomości, np. uwagi, typu bodźca czy zależności czasowej pomiędzy bodźcem a reakcją [Vermeiren i Cleeremans 2012].

W ciągu ostatnich kilkunastu lat rozwijano narzędzia łączące obiektywny pomiar poprawności wykonania zadania z próbą ilościowego opisu subiektywnego doświadczenia badanych osób. Dokonuje się tego przy użyciu samoopisowych skal, z pomocą których badany ma dostarczyć wyrażonego w sposób ilościowy opisu swojego stanu wewnętrznego. Do wcześniejszych procedur eksperymentalnych dodano element samoopisowy – po każdej zgodnej z instrukcją reakcji dyskryminującej osoba badana jest proszona o ocenę swojego doświadczenia (np. jak dobrze widziała prezentowany bodziec). Tak powstały miary wykorzystujące teorię detekcji sygnału, np. d' drugiego typu, gdzie za postrzegane świadomie uznaje się tylko reakcje poprawne, które dodatkowo zostały wysoko ocenione na skali widzialności [Maniscalco i Lau 2012]. Istnieje także kilka skal subiektywnego doświadczenia odwołujących się do różnych aspektów świadomego przeżycia [ich przegląd: Wierzchoń, Asanowicz, Paulewicz i Cleeremans 2012]. Motywem ich tworzenia była chęć ustalenia, kiedy i czego w rzeczywistości jest świadoma osoba badana, oraz stworzenia miar bardziej czułych na zmiany w świadomym doświadczeniu pojedynczych osób.

Badacze korzystający z tych narzędzi, zarówno obiektywnych, jak i subiektywnych, badają świadomość, którą rozumieją jako subiektywne doświadczenie pewnej określonej stymulacji zewnętrznej. Taka konceptualizacja, konieczna z perspektywy eksperymentalnej, ma pewne wady. Przede wszystkim osoba badana biorąca udział w eksperymencie jest cały czas świadoma. Można przypuszczać, że podczas prób zakwalifikowanych później jako nieświadome badani zdawali sobie sprawę z czegoś (po prostu było to coś innego niż przygotowany przez naukowców bodziec). Szczególnie niekorzystnie mogłoby to wpłynąć na badania, w których wykorzystuje się neuroobrazowanie, ponieważ korelat świadomości byłby obecny we wszystkich warunkach, uniemożliwiając jego wyłowienie metodą kontrastu. Potrzeba innego sposobu myślenia o korelatach świadomości i innych metod ich poszukiwania.

Sen – królewska droga do świadomości

Literatura przedmiotu pełna jest różnych definicji świadomości nawiązujących do wiedzy potocznej, hipotetycznych funkcji, korzeni filogenetycznych czy funkcjonowania mózgu. Pośród tego teoretycznego wielogłosu trudno wyłowić konceptualizacje, które byłyby w stanie objąć całość doświadczeń uznawanych za świadome. Udaje się to w definicji Searle'a [1999], który rozumie świadomość jako „ten stan odczuwania i przytomności, który zaczyna się zwykle, gdy budzimy się rano ze snu [pozbawionego marzeń sennych – przyp. aut.], i trwa tak długo, aż znów zaśniemy wieczorem”. Trudno ukryć, że taka lakoniczność każe podać w wątpliwość przydatność definicji do celów eksperymentalnych. Bardzo dobrze jednak oddaje sposób myślenia o świadomości, odmienny od opisywanego wcześniej i powiązanego z uświadamieniem konkretnych treści.

Definicja Searle'a nie mówi w zasadzie nic o tym, czym świadomość sama w sobie jest. Wskazuje jednak precyzyjnie, kiedy najpewniej jesteśmy świadomości pozbawie-

ni – podczas głębokiego snu bez marzeń sennych. W tej definicji świadomość jest traktowana jako właściwość organizmu, którą w pewnych warunkach się posiada, a w innych traci, a nie jako stopień uświadomienia konkretnych treści. Nie jest już istotna treść doświadczenia, lecz raczej taka organizacja systemu przetwarzającego informacje, która umożliwia pojawienie się subiektywnych doznań. W badaniu tak właśnie rozumianej świadomości nie ma miejsca na porównywanie różnych rodzajów treści doświadczenia, ale raczej są z sobą zestawiane różne momenty, w których zgodnie z naszymi założeniami badany system (w tym wypadku mózg) jest lub nie jest zdolny takie doświadczenia wytworzyć. Wprawdzie tego typu podejście znacznie ogranicza możliwości manipulacji eksperymentalnej (przy braku świadomości prezentowanie uczestnikom bodźców i oczekiwanie odpowiedzi jest daremnym przedsięwzięciem), jednak pozwala ominąć problem precyzyjnego określania odpowiedniości treści subiektywnych stanów wewnętrznych człowieka.

Sen, będąc naturalnym stanem pozbawienia świadomości (w przeciwieństwie do wielu patologicznych przypadków, jak śpiączka, odurzenie substancjami chemicznymi czy zaśnięcie), wydaje się też najlepszym kandydatem do szukania mózgowych korelatów świadomości. Obiecującą próbą zrealizowania badań opartych na tym pomysle okazała się praca zespołu badawczego skupionego wokół Giulio Tononiego oraz Marcello Massiminiego, o której można przeczytać w ich szeroko cytowanej publikacji [Massimini i in. 2005]. Badacze postawili sobie za cel rozpoznanie mechanizmów odpowiedzialnych za zapadanie człowieka w sen. Mózgi osób przytomnych oraz osób we śnie wystawiono na działanie przezczaszkowej stymulacji magnetycznej (ang. *transcranial magnetic stimulation* – TMS). Procedura ta polega na wielokrotnym wzbudzaniu przepływu prądu przez neurony kory mózgowej za pomocą elektromagnesu umieszczonego przy czaszce osoby badanej. Jednocześnie rejestruje się u takich osób sygnał EEG w celu oceny wpływu stymulacji na funkcjonowanie mózgu.

Badacze poszukiwali różnic w sposobie przesyłania impulsów elektrycznych pomiędzy neuronami pod wpływem zewnętrznie wygenerowanego pobudzenia. Zauważyli, że mózgi osób w głębokim śnie NREM odpowiadały aktywnością o mniejszej sile oraz węższym zasięgu niż u osób przytomnych. Zespół Tononiego interpretował otrzymane wyniki w taki sposób, że istnieje zasadnicza różnica w sposobie przetwarzania informacji pomiędzy systemem świadomym a takim, który świadomości jest pozbawiony. Taki pogląd ma swoje korzenie w ogólnej teorii świadomości zaproponowanej na początku XXI wieku przez Edelmiana i Tononiego [2000]. W teorii tej kładzie się największy nacisk na aspekt informacyjny świadomego doświadczenia. Każde przeżycie, którego doświadczamy, jest według badaczy wysoce informatywnym odróżnieniem danego stanu od innych stanów. Wysoka informatywność oznacza, że świadomość pozwala nam odróżnić dany moment od każdego innego, nawet jeżeli są one do siebie niezwykle podobne. Ta właściwość nie tylko miałaby znaleźć swoje odbicie w pracy mózgu (właściwie nieskończonej liczbie kombinacji aktywacji neuronów), ale przede wszystkim byłaby rezultatem specyficznego sposobu przetwarzania informacji przez sieci neuronalne mózgu, dzięki któremu świadomość mogłaby zaistnieć.

Teoria zintegrowanej informacji

Edelman i Tononi [2000] wskazują na dwie główne cechy, które odróżniają świadome procesy od wszystkich innych zachodzących w ludzkim umyśle. Po pierwsze, każde takie doświadczenie jest zintegrowane – nie występuje jako prosta suma dopływających do nas zewnętrznych i wewnętrznych danych percepcyjnych, ale jest w pewnym sensie emergentne, to znaczy stanowi trwałe połączenie tych danych, jakościowo różne od pojedynczych składników. Łączenie z sobą tak wielu informacji w jedno skutkuje drugą własnością – zróżnicowaniem – która przekłada się na wyjątkowość każdego świadomego doświadczenia i możliwość odróżnienia go od innych, wcześniejszych lub późniejszych. Tononi i jego zespół nie ograniczają się jednak wyłącznie do takiego fenomenologicznego opisu, ale postulują, jakie te właściwości mają mieć odpowiedniki na poziomie neuronalnym i jak można je scharakteryzować za pomocą matematycznych równań przepływu informacji.

Teoria zintegrowanej informacji (ang. *Information Integration Theory*) postuluje, że każdy system, który potrafi zintegrować ogrom informacji sensorycznych w spójne i interpretowalne doświadczenie, jest zdolny do wytworzenia subiektywnego wrażenia [Tononi 2008]. Neurony, zlokalizowane w sieciach obejmujących korę oraz wzgórze, organizują się tymczasowo, tworząc tzw. dynamiczny rdzeń (ang. *dynamic core*) – komórki nerwowe powiązane funkcjonalnie w celu integracji stymulacji [Edelman 2003]. Spójność, czyli poziom wewnętrznego połączenia informacji, można zmierzyć – badacze operacjonalizują ją jako ilość informacji oddziałującej przyczynowo na aktywację pomiędzy dwoma najbardziej oddalonymi od siebie punktami w obrębie wspomnianego funkcjonalnego rdzenia. Odpowiednikiem na poziomie neuronalnym byłaby zdolność połączeń w układzie wzgórzowo-korowym do efektywnego wywołania określonej aktywności innych grup neuronów w sieci. Im bardziej aktywność mózgowa byłaby wewnętrznie powiązana (a mniej przypadkowa i lokalna), tym większy byłby w danym systemie poziom świadomości [Tononi 2004, 2010].

Rozumienie świadomości jako specyficznego trybu aktywności połączeń o dalekim zasięgu w układzie wzgórzowo-korowym czyni z niej własność względnie niezależną od innych cech systemu przetwarzającego informacje (np. metabolizmu czy pojawiania się konkretnych oscylacji). Obecność funkcjonujących w ten sposób sieci neuronalnych jest zdaniem Tononiego warunkiem koniecznym do pojawienia się świadomości, choć może nie być wystarczającym. Kluczowe jest tu założenie, że brak oznak działania wspomnianej sieci wzgórzowo-korowej powinien charakteryzować wszystkie przypadki, w których człowiek jest pozbawiony świadomości.

Teoria Tononiego wykracza poza kontekst danego eksperymentu, określoną modalność zmysłową czy treściowy charakter dostarczanej stymulacji. Aspiruje do określenia, jak – idealnie – powinien funkcjonować system, aby mogła zaistnieć świadomość, oraz proponuje narzędzia, które powinny pozwolić ocenić podobieństwo interesującego nas systemu (np. mózgu) do takiego idealnego modelu. Dzięki temu badacze nie muszą przejmować się doborem bodźców, tym, czy są zauważalne, chęcią współpracy osób badanych czy zmianami poziomu uwagi. Mózg powinien zachować swój specyficzny dla świadomego systemu sposób organizacji i przetwarzania informacji niezależnie od tego, czego w danym momencie doświadcza osoba badana.

Wykorzystując stymulację TMS oraz narzędzia matematycznej analizy sygnału EEG, powinno dać się zaobserwować różnicę w sposobie przekazywania sobie stymulacji neuronów osób mających w danym momencie świadome doznania i tych, którzy są ich pozbawieni. Hipoteza ta została przetestowana w serii kolejnych eksperymentów dotyczących zarówno naturalnych, jak i indukowanych stanów braku świadomości. Powtórzono pierwotne badanie na śpiących osobach i uzyskano wyniki potwierdzające wcześniejsze obserwacje dotyczące stanu głębokiego snu [Massimini i in. 2007] oraz odkryto podobne zależności u osób poddanych ogólnemu znieczuleniu [Alkire, Hudetz i Tononi 2008; Boly i in. 2012; Ferrarelli i in. 2010], u pacjentów znajdujących się w stanie wegetatywnym lub w stanie minimalnej świadomości [Rosanova i in. 2012], a także w fizjologicznej bądź farmakologicznej śpiączce [Noirhomme i in. 2010]. Jednocześnie podobne badania podczas snu REM (snu, w czasie którego występują marzenia sennie), kiedy aktywność kory jest wzmożona, nie wykazały żadnych różnic pod względem funkcjonalnych połączeń w porównaniu z osobami przytomnymi [Massimini i in. 2010].

Tononi wraz z zespołem przekonują, że takie wyniki wspierają hipotezę o istnieniu jednego mechanizmu umożliwiającego pojawienie się świadomości, opartego na połączeniach o dalekim zasięgu pomiędzy wzgórzem i różnymi obszarami kory mózgowej. Załamanie się efektywności tych połączeń miałooby zawsze skutkować utratą świadomości, zarówno podczas naturalnych procesów, jak i głębokiego snu, oraz w przypadku wydarzeń nienaturalnych, takich jak śpiączka, stan wegetatywny czy znieczulenie ogólne. Ostatnie działania badaczy zmierzają ponadto do opracowania nowej miary świadomości, która wykorzystywałaby wymuszoną aktywność mózgu (np. dzięki stymulacji TMS) do szacowania wskaźnika, który miałby charakteryzować poziom świadomości u pojedynczego człowieka w momencie badania.

Psychofizjologiczne miary świadomości

Idea miary wykorzystującej bioelektryczną aktywność ludzkiego mózgu nie jest jednak nowa. Literatura przedmiotu obfituje w propozycje przeróżnych wskaźników, które miałyby służyć do wnioskowania na temat procesów psychicznych, w tym świadomości. Najbardziej znanym pomysłem tego typu jest klasyczne wyróżnienie stadiów snu (obecnie trzy fazy NREM i faza REM) i czuwania na podstawie procentowego składu poszczególnych typów fal mózgowych w zapisie EEG [Kales i Rechtschaffen 1968]. Choć kryteria dotyczą statystycznego rozkładu częstotliwości pracy właściwie całego mózgu, posiadają one korelaty behawioralne powiązane z konkretnymi funkcjami (np. jedynie podczas fazy NREM3 osoba śpiąca nie reaguje na własne imię).

Podobne zabiegi analizujące różne aspekty aktywności elektrycznej mózgu stosowano już w przeszłości do uchwycenia zmian zachodzących w świadomości. Casali i inni [2013] dzielą ten zbiór istniejących w literaturze markerów neurofizjologicznych na dwie zasadnicze grupy. Pierwszy typ stanowią metody próbujące szacować „bogactwo” rejestrowanego sygnału lub ilość niesionej w nim informacji. Oceniają one, czy rejestrowana aktywność kory (zarówno spontaniczna, jak i wywołana stymulacją) jest wystarczająco różnicująca (np. czy sygnał EEG ulega zmianie w zależ-

ności od typu bodźca, czy przeciwnie – kora reaguje stereotypowo na szerokie spektrum stymulacji). Mogą też oceniać złożoność sygnału, np. jak wiele częstotliwości fal można w nim wyodrębnić. Na takiej analizie spektrum bazuje popularny indeks bispektralny [Rosow i Manberg 2001], służący anestezjologom do pomiaru poziomu sedacji pacjenta podczas zabiegów medycznych. Innymi wskaźnikami tego typu może być np. szacowanie entropii [Pincus, Gladstone i Ehrenkranz 1991] lub entropii widma sygnału [Johnson 1987], których zadaniem jest przybliżenie, na ile rejestrowana aktywność zdradza faktyczne przetwarzanie informacji, a nie jedynie redundantne przekazywanie tej samej treści.

Druga grupa metod wykorzystuje przestrzenną analizę rozprzestrzeniania się sygnału lub synchronizację półkul mózgowych. Należy do niej m.in. badanie późnych potencjałów wywołanych [Plourde i Picton 1991] czy propagacji stymulacji elektrycznej wywołanej za pomocą TMS [Ragazzoni i in. 2013]. Cytowani badacze śledzili, jak aktywność wywołana stymulacją przemieszcza się po mózgu, wiążąc większą sprawność kory (oraz idący za tym wyższy poziom świadomości) ze zdolnością do propagacji sygnału do dalszych obszarów. Do tej grupy zaliczają się również próby szacujące poziom synchronizacji różnych obszarów mózgu podczas analizy różnej stymulacji. Dobrym przykładem są tu miary łączliwości korowej [Boly i in. 2011], szukające związków przyczynowych pomiędzy aktywacją w różnych rejonach kory. Niestety w próbach tych, nawet jeśli można było rozróżniać poziomy świadomości, było to możliwe jedynie na poziomie analiz danych grupowych – nie dało się poprawnie ocenić stanu pojedynczego człowieka (co jest konieczne w przypadku diagnozowania osób z zaburzeniami świadomości).

Perturbacyjny Indeks Złożoności

Zaproponowany przez badaczy skupionych wokół Tononiego Perturbacyjny Indeks Złożoności (ang. *Perturbational Complexity Index* – PCI) ma w założeniu zawierać najlepsze cechy dostępnych do tej pory metod, a być pozbawionym ich trudności i niedostatków. Autorzy PCI wskazują na zasadnicze różnice pomiędzy ich indeksem a innymi miarami i wcześniejszymi próbami podejmowanymi przez ich własny zespół [Sarasso i in. 2014].

Przedewszystkim PCI jest ugruntowany w teorii zintegrowanej informacji – wykorzystuje pomiar kluczowych charakterystyk systemu zdolnego do podtrzymania świadomości. Istotne, zdaniem Tononiego, fenomenologiczne cechy świadomości, czyli zróżnicowanie i zintegrowanie, mają być odzwierciedlane w charakterystyce sygnału EEG u osoby, której mózg jest zewnątrznie stymulowany za pomocą TMS. Wspomniane wcześniej dwie grupy metod psychofizjologicznych mierzą, według Tononiego, dwie podstawowe własności świadomego systemu – wysokie zróżnicowanie oraz integrację przetwarzanych informacji.

Zróżnicowanie odpowiadałoby „bogactwu” informacyjnemu zawartemu w rejestrowanym sygnale. Można nim zatem mierzyć redundantność aktywności kory (im byłaby mniejsza, tym zawartość informacyjna byłaby większa). Integracja przejawiałaby się natomiast w zdolności mózgu do przekazywania aktywacji pomiędzy odległy-

mi rejonami kory oraz do synchronizacji pracy w celu szybszego i skuteczniejszego przetworzenia otrzymanych informacji.

Procedura eksperymentalna polegała na stymulacji kory osoby badanej za pomocą TMS wraz z jednoczesną rejestracją aktywności mózgu poprzez EEG. W celu zwiększenia skuteczności procedur statystycznych zarówno stymulacja TMS, jak i pomiar odpowiedzi mózgowej wykonywane były wielokrotnie, aby następnie uśrednić wyniki otrzymane z każdej próby [Casali i in. 2013]. Analizie poddawano pierwsze 300ms surowego zapisu EEG po każdym uderzeniu impulsu z TMS, algorytmicznie przetwarzając uzyskany sygnał w binarną matrycę (gdzie na osi x zostały umieszczone punkty czasowe pomiaru, natomiast na osi y – wszystkie elektrody rejestrujące sygnał). Następnie używając algorytmu Lempela-Ziva, za pomocą którego szacuje się złożoność sygnału, dokonywano kompresji otrzymanej matrycy. Użycie algorytmu kompresji informacji powodowało, że im większe fragmenty wspomnianej matrycy były do siebie podobne, tym niższy współczynnik złożoności był jej przypisywany. Ostatni krok stanowiła normalizacja uzyskanego wyniku, której rezultatem była pojedyncza wartość liczbową pomiędzy zero a jeden. Oznacza to tyle, że bardziej skomplikowany wzór aktywności (wskazujący, jak mówi teoria Tononiego, na wyższy poziom świadomości) otrzymywał wynik bliższy jedynce.

Walidację metody postanowiono przeprowadzić na grupach ochotników oraz różnych grupach pacjentów, co do których można było mieć najwyższą możliwą pewność, że ich poziom świadomości odbiega od zdrowych przytomnych ludzi [Casali i in. 2013]. Okazało się, że na podstawie pomiaru PCI można odróżnić grupy osób przytomnych (indeks pomiędzy 0,44 a 0,67) od tych, które pogrążone były w głębokim śnie (indeks wynosił od 0,18 do 0,28). Autorzy uważają, że różnice pomiędzy grupami są na tyle znaczące, że można mieć nadzieję, iż PCI będzie użyteczny w diagnozowaniu poziomu świadomości u pojedynczych osób.

Wniosek ten jest wzmacniany przez kolejne wyniki – tym razem uzyskane dla osób zdrowych będących pod wpływem różnych anestetyków: midazolamu (PCI od 0,18 do 0,28), propofolu (PCI 0,13–0,30) czy xenonu (PCI 0,12–0,31). Ostatnią przebadaną grupą były osoby z diagnozą zaburzeń świadomości o różnym stopniu nasilenia. Tutaj również indeks PCI potwierdził przewidywania co do swojej czułości, gdy wynik dla osób w stanie wegetatywnym (PCI 0,12–0,31) był podobny do wyniku dla osób w głębokim śnie i w znieczuleniu ogólnym. Osoby badane będące w stanie minimalnej świadomości uzyskiwały wyniki wyższe (PCI 0,32–0,49), jednak ciągle istotnie poniżej wyników zdrowych i przytomnych ochotników.

Jak słusznie zauważają w swoim komentarzu Sitt, King, Naccache i Dehaene [2013], opracowana przez Casaliego i współpracowników metoda wydaje się charakteryzować nieosiągniętą nigdy wcześniej czułością na zmiany w świadomości, co więcej – na poziomie analizy danych indywidualnych, a nie tylko grupowych. Nowe narzędzie może przynieść szczególne korzyści dla diagnozowania pacjentów z zaburzeniami świadomości, poprzez precyzyjny pomiar zdolności kory mózgowej do utrzymywania osoby w stanie świadomości. Należy jednak mieć na względzie, że badanie zostało przeprowadzone na stosunkowo niewielkiej próbie osób i konieczne byłyby kliniczne testy efektywności tej metody. Nie jest ona również pozbawiona potencjalnych technicznych trudności – żeby przeprowadzić badanie, trzeba wygenerować setki impul-

sów TMS w celu otrzymania stabilnego wskazania PCI. Tak długa procedura eksperymentalna może się okazać męcząca i nieprzyjemna dla osób, które są jej poddawane. Ponadto jej wyniki mogą być zakłócone przez dynamicznie zmieniający się poziom świadomości, np. u pacjentów w stanie minimalnej świadomości.

Czy PCI to już świadomościomierz?

Indeks PCI wydaje się narzędziem najbardziej z dotychczasowych zbliżonym do ideału uniwersalnego świadomościomierza, z którego stroił sobie żarty Chalmers w słynnym wystąpieniu. I choć nie wystarczy tego narzędzia po prostu wycelować, jak suszarkę Chalmersa, w stronę człowieka, by od razu odczytać poziom jego świadomości, to jednak możliwość przełożenia złożonej aktywności neuronalnej na jeden, zaskakująco czuły, parametr wydaje się pociągająca. Skuteczność indeksu PCI w określaniu poziomu świadomości byłaby również najmocniejszym dowodem poprawności teorii świadomości rozwijanej przez Tononiego i jego zespół. Istotna jest jednak również jego krytyka. Sami jego autorzy wskazują na zintegrowane i zróżnicowane przetwarzanie informacji jako warunek konieczny, lecz nie zawsze wystarczający do zaistnienia świadomości.

Oczywiście stosuje się do niego podstawowy zarzut filozofa – nie mierzy bezpośrednio świadomego doświadczenia osoby, lecz jedynie konkretną psychofizjologiczną aktywność mózgu, która na podstawie przyjętej z góry teorii uznawana jest za korelat świadomości. Zarzut ten można pociągnąć dalej: wydaje się, że indeks PCI jako narzędzie oraz podbudowująca go teoria, żeby przyczynić się do badań nad świadomością – których podstawowym celem jest wykazanie, czy świadomość istnieje, a jeśli tak, to czym jest – muszą istnienie świadomości założyć na wstępie, by takie badanie z ich pomocą w ogóle było możliwe. Co więcej, zakładając ją, w zasadzie jej nie definiuje, tylko wskazuje: teraz świadomość jest, a teraz nie. Taka ostensywna definicja świadomości nie wykracza poza to, co już wiadomo i jako punkt wyjścia w badaniu, którego w zasadzie nie da się przekroczyć, znacznie utrudnia zdobycie nowej i wartościowej wiedzy.

Wydaje się, że korzystając z tego narzędzia, nie potrafimy odpowiedzieć na teoretyczne i filozoficzne pytania dotyczące istnienia i natury świadomości: ani czym jest, ani czy w ogóle istnieje. Pytania, na które możemy odpowiedzieć, są pytaniami raczej praktycznymi i technicznymi. Jednak potencjalne korzyści teoretyczne i badawcze płynące z posiadania takiego narzędzia, a także z jego krytyki, schodzą na dalszy plan, gdy pomyśli się o jego potencjalnych walorach praktycznych. Gdyby indeks PCI dowiódł swojej przydatności, zastąpiłby prawdopodobnie dotychczasowe metody diagnozowania pacjentów z zaburzeniami świadomości. Dałoby to większą szansę na prawidłowe rozpoznanie stanu takiej osoby, przez to na odpowiednią rehabilitację, a w niektórych przypadkach – szczęśliwe odzyskanie pełni świadomości.

BIBLIOGRAFIA

- Alkire M.T., Hudetz A.G., Tononi G. (2008). *Consciousness and anesthesia*. „Science” 322 (5903), s. 876–880.
- Boly M., Garrido M.I., Gosseries O., Bruno M.-A., Boveroux P., Schnakers C., Friston K. (2011). *Preserved feedforward but impaired top-down processes in the vegetative state*. „Science” 332 (6031), s. 858–862.
- Boly M., Moran R., Murphy M., Boveroux P., Bruno M.-A., Noirhomme Q., Friston K. (2012). *Connectivity changes underlying spectral EEG changes during propofol-induced loss of consciousness*. „The Journal of Neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience” 32 (20), s. 7082–7090.
- Casali A.G., Gosseries O., Rosanova M., Boly M., Sarasso S., Casali K.R., Massimini M. (2013). *A theoretically based index of consciousness independent of sensory processing and behavior*. „Science Translational Medicine” 5 (198).
- Chalmers D.J. (1998). *On the search for the neural correlate of consciousness* [w:] S.R. Hameroff, A.V. Kaszniak, A. Scott (red.), *Toward a Science of Consciousness II: The Second Tucson Discussions and Debates* (s. 219–229). Cambridge: MIT Press.
- Crick F., Koch C. (1990). *Towards a neurobiological theory of consciousness*. „Seminars in the Neurosciences” 2, s. 263–275.
- Dehaene S. (2008). *Distinct forms of evidence accumulation?* [w:] Ch. Engel, W. Singer (red.), *Better Than Conscious?: Decision Making, the Human Mind, and Implications for Institutions*. Cambridge: MIT Press.
- Edelman G.M. (2003). *Naturalizing consciousness: a theoretical framework*. „Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America” 100 (9), s. 5520–5524. doi:10.1073/pnas.0931349100.
- Edelman G.M., Tononi G. (2000). *A Universe of Consciousness: How Matter Becomes Imagination*. New York: Basic Books.
- Ferrarelli F., Massimini M., Sarasso S., Casali A., Riedner B.A., Angelini G., Pearce R.A. (2010). *Breakdown in cortical effective connectivity during midazolam-induced loss of consciousness*. „Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America” 107 (6), s. 2681–2686.
- Holender D. (1986). *Semantic activation without conscious identification in dichotic listening, parafoveal vision, and visual masking: A survey and appraisal*. „Behavioral and Brain Sciences” 9 (01), s. 1–23.
- Johnson R.W. (1987). *Relative-entropy minimization with uncertain constraints: Theory and application to spectrum analysis* [w:] C.R. Smith, G.J. Erickson (red.), *Maximum-Entropy and Bayesian Spectral Analysis and Estimation Problems* (s. 57–73). Springer Netherlands.
- Kales A., Rechtschaffen A. (1968). *A Manual of Standardized Terminology, Techniques and Scoring System for Sleep Stages of Human Subjects*. U.S. National Institute of Neurological Diseases and Blindness, Neurological Information Network.
- Maniscalco B., Lau H. (2012). *A signal detection theoretic approach for estimating metacognitive sensitivity from confidence ratings*. „Consciousness and Cognition” 21 (1), s. 422–430.
- Massimini M., Ferrarelli F., Esser S.K., Riedner B.A., Huber R., Murphy M., Tononi G. (2007). *Triggering sleep slow waves by transcranial magnetic stimulation*. „Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America” 104 (20), s. 8496–8501.
- Massimini M., Ferrarelli F., Huber R., Esser S.K., Singh H., Tononi G. (2005). *Breakdown of cortical effective connectivity during sleep*. „Science” 309 (5744), s. 2228–2232.
- Massimini M., Ferrarelli F., Murphy M., Huber R., Riedner B.A., Casarotto S., Tononi G. (2010). *Cortical reactivity and effective connectivity during REM sleep in humans*. „Cognitive Neuroscience” 1 (3), s. 176–183.

- Miller G. (2005). *What is the biological basis of consciousness?* „Science” 309 (5731), s. 79.
- Noirhomme Q., Soddu A., Lehembre R., Vanhaudenhuyse A., Boveroux P., Boly M., Laureys S. (2010). *Brain connectivity in pathological and pharmacological coma*. „Frontiers in Systems Neuroscience” 4. doi: 10.3389/fnsys.2010.00160.
- Pincus D.S.M., Gladstone I.M., Ehrenkranz R.A. (1991). *A regularity statistic for medical data analysis*. „Journal of Clinical Monitoring” 7 (4), s. 335–345.
- Plourde G., Picton T.W. (1991). *Long-latency auditory evoked potentials during general anesthesia: N1 and P3 components*. „Anesthesia and Analgesia” 72 (3), s. 342–350.
- Ragazzoni A., Pirulli C., Veniero D., Feurra M., Cincotta M., Giovannelli F., Miniussi C. (2013). *Vegetative versus minimally conscious states: a study using TMS-EEG, sensory and event-related potentials*. „PloS one” 8 (2). doi: 10.1371/journal.pone.0057069.
- Rosanova M., Gosseries O., Casarotto S., Boly M., Casali A.G., Bruno M.-A., Massimini M. (2012). *Recovery of cortical effective connectivity and recovery of consciousness in vegetative patients*. „Brain: A Journal of Neurology” 135 (Pt 4), s. 1308–1320.
- Rosow C., Manberg P.J. (2001). *Bispectral index monitoring*. „Anesthesiology Clinics of North America” 19 (4), s. 947–966.
- Sarasso S., Rosanova M., Casali A.G., Casarotto S., Fecchio M., Boly M., Massimini M. (2014). *Quantifying cortical EEG responses to TMS in (un)consciousness*. „Clinical EEG and Neuroscience” 45 (1), s. 40–49.
- Searle J.R. (1999). *Umysł, język, społeczeństwo: filozofia i rzeczywistość*. Warszawa: Wydawnictwo CiS.
- Sitt J.D., King J.-R., Naccache L., Dehaene S. (2013). *Ripples of consciousness*. „Trends in Cognitive Sciences” 17 (11), s. 552–554.
- Tononi G. (2004). *An information integration theory of consciousness*. „BMC Neuroscience” 5 (1), s. 42.
- Tononi G. (2008). *Consciousness as integrated information: A provisional manifesto*. „The Biological Bulletin” (December), s. 216–242.
- Tononi G. (2010). *Information integration: its relevance to brain function and consciousness*. „Archives Italiennes de Biologie” 148 (3), s. 299–322.
- Vermeiren A., Cleeremans A. (2012). *The validity of d' measures*. „PloS one” 7 (2), e31595. doi: 10.1371/journal.pone.0031595.
- Wierchoń M. (2013). *Granice świadomości*. Kraków: Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego.
- Wierchoń M., Asanowicz D., Paulewicz B., Cleeremans A. (2012). *Subjective measures of consciousness in artificial grammar learning task*. „Consciousness and Cognition” 21 (3), s. 1141–1153.